

## 明 細 書

### 高周波用磁性薄膜およびその作製方法ならびに磁気素子

### 技術分野

- [0001] 本発明は、GHz帯の高周波領域で利用される高周波用磁性薄膜およびその作製方法、ならびにその高周波用磁性薄膜を有する磁気素子に関し、さらに詳しくは、薄膜インダクタや薄膜トランス等の高周波用の平面型磁気素子やモノリシックマイクロ波集積回路(以下、MMICと略す。)等に好ましく用いられる高周波用磁性薄膜およびその作製方法、ならびに磁気素子に関するものである。

### 背景技術

- [0002] 近年の磁気素子の小型化および高性能化への要求に伴い、GHz帯域で高い透磁率を示す磁性薄膜材料が求められている。
- [0003] 例えば、ワイヤレス送受信装置や携帯情報端末を中心に需要が高まっているMMICは、Si、GaAsまたはInP等の半導体基板上に、トランジスタ等の能動素子と、線路、抵抗、キャパシタ、インダクタ等の受動素子とを、一括的且つ一体的に作製して構成される高周波集積回路であるが、このMMICにおいては、特にインダクタやキャパシタ等の受動素子が能動素子に比べて大きな面積を占めている。MMICにおける受動素子の大きな面積の占有は、結果として高価な半導体基板の大量消費、すなわちMMICのコストアップにつながることになる。MMICの製造コストを低減するためにはチップ面積を縮小することが必要であるが、そのためには、受動素子が占める面積を縮小することが課題となっている。
- [0004] 上述したMMICには、平面型のスパイラルコイルがインダクタとして多く用いられている。こうした平面型のスパイラルコイルにおいては、小さな占有面積でも従来同様のインダクタンスを得るために、その上下面または片面に軟磁性薄膜を設けることによるインダクタンスの増加が図られている(例えば、J.Appl.Phys.,85,7919(1999)を参照)。しかし、磁性材料をMMICのインダクタに応用するためには、先ず、GHz帯域における透磁率が高く且つ高周波損失が少ない軟磁性薄膜材料を開発することが求められている。さらに、高周波での渦電流損失を減らすため、比抵抗が大きいこと

も求められている。

- [0005] 高い飽和磁化を持つ磁性材料として、FeまたはFeCoを主成分とする合金がよく知られている。しかし、Fe系またはFeCo系合金からなる磁性薄膜をスパッタ等の成膜技術により作製すると、得られた膜は飽和磁化が高いものの、膜の保磁力が大きく、また、比抵抗が小さくなってしまい、良好な高周波特性を得ることは困難であった。
- [0006] 一方、軟磁気特性に優れる材料として、Co系非結晶質合金が知られている。このCo系非結晶質合金は、Coを主成分とし、Y、Ti、Zr、Hf、Nb、Ta等から選択される1種または2種以上の元素を含む非結晶質を主体とするものである。しかし、ゼロ磁歪組成のCo系非結晶質合金の磁性薄膜をスパッタ等の成膜技術により作製すると、得られた膜は透磁率が高いものの、飽和磁化が1.1T(テスラ)(=11kG(キロガウス))程度であり、飽和磁化がFe系材料に比べて小さいという難点がある。さらに、100MHz程度の周波数を超えてからの損失成分(透磁率の虚数部 $\mu_2$ )が大きくなり、高周波帯域で使用する磁性材料としては好適とはいえなかった。
- [0007] このような従来からの実情のもとに、軟磁性薄膜の高周波特性を改良するための種々の提案がなされている。その改良の基本方針としては、渦電流損失の抑制や共鳴周波数の上昇等が挙げられている。渦電流損失を抑制させる具体的な方策としては、例えば、 $0.01\mu\text{m}$ 〜 $0.3\mu\text{m}$ のCo系非晶質合金層と $0.02\mu\text{m}$ 〜 $0.25\mu\text{m}$ の絶縁層との積層による多層化(例えば、特開平7-249516号公報(第1頁)、日本応用磁気学会誌、16,291(1992)、日本応用磁気学会誌、17,489(1993)を参照)が提案されている。
- [0008] 軟磁気特性に優れるCo系非結晶質合金を用いてGHz帯のインダクタの実現を図ったものとして、磁性薄膜を磁化容易軸に平行な辺を長手方向とする短冊にマイクロパターン化し、形状磁気異方性エネルギーを増大させて共鳴周波数を高周波側にシフトさせる試みが行われている(例えば、日本応用磁気学会誌、24,879(2000)を参照)。
- [0009] しかしながら、上記の特開平7-249516号公報、日本応用磁気学会誌、16,291(1992)、日本応用磁気学会誌、17,489(1993)で提案された方法では、MHz帯域での応用の可能性はあるものの、GHz帯域で使用する磁性薄膜としては好適とはいえ

なかった。

- [0010] また、上記の日本応用磁気学会誌、24,879(2000)で提案された方法では、マイクロパターン化により異方性磁界を $10^4 / \pi$  [A/m] (=40Oe(エルステッド))程度にまで挙げる事ができるので、共鳴周波数をGHz帯域まで挙げる事ができたが、短冊状のマイクロパターンを複雑なフォトリソグラフィ工程で作製することが必要であるという難点がある。

### 発明の開示

- [0011] 本発明は、上記課題を解決するためになされたものであって、その第1の目的は、GHz帯域の高周波領域で利用できる高周波用磁性薄膜を提供することにある。本発明の第2の目的は、そうした特性を有する高周波用磁性薄膜の作製方法を提供することにある。本発明の第3の目的は、GHz帯域での高周波特性のよい高周波用磁性薄膜を用いた磁気素子を提供することにある。
- [0012] 本発明者は、軟磁気特性を有するCo系非晶質合金を利用した高周波用磁性薄膜についての研究を行っている過程で、Co系非晶質合金層とそのCo系非晶質合金の酸化層とで多層化した場合に異方性磁界が現れることを見出し、その大きな異方性磁界を利用した高周波用磁性薄膜の研究をさらに行った結果、多層膜全体に対する酸化層の体積が所定の範囲内にある場合に大きな異方性磁界が現れ、GHz帯域での高周波特性に優れる磁性薄膜が得られることを知見した。
- [0013] 上記第1の目的を達成する本発明の高周波用磁性薄膜は、上記知見に基づいてなされたものであって、Co系非晶質合金層と、このCo系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜であって、多層膜全体の体積に対する酸化層の割合が5〜50%であるように構成されたものである。
- [0014] 本発明によれば、上記構成からなる多層膜には高い比抵抗と高い異方性磁界が現れるので、GHz帯域での高周波特性に優れた磁性薄膜となる。
- [0015] また、本発明における他の高周波用磁性薄膜は、成膜時における磁場印加方向が磁化容易軸となる性質をもつCo系非晶質合金層と、このCo系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜であって、作製された多層膜の磁化容易軸が、この多層膜の成膜時における磁場印加方向と直交するように構成されたものである。

- [0016] Co系非晶質合金層は、通常、成膜時における磁場印加方向が磁化容易軸となる性質をもつが、本発明の高周波磁性薄膜のように、Co系非晶質合金層とその酸化層とで多層膜を構成すると共に、多層膜全体の体積に対する酸化層の割合が5〜50%の範囲内となるように印加磁場中で多層膜を成膜した場合には、作製された多層膜の磁化容易軸が多層膜の成膜時における磁場印加方向と直交するという、磁化容易軸／困難軸の反転現象が現れる。こうした現象はいわゆる磁歪の逆効果と考えられるが、本発明の高周波磁性薄膜は、その現象に基づいて発現する大きな異方性磁界を示すと共に比抵抗も高くなるので、GHz帯域での高周波特性に優れた磁性薄膜となる。
- [0017] 本発明の高周波磁性薄膜では、特に、(i) Co系非晶質合金層がCoZrNb合金で形成されていること、(ii)比抵抗が $150 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上であり、異方性磁界が $10^5 / 4 \pi [\text{A/m}] (= 100 \text{ Oe})$ 以上であること、または、(iii) 強磁性共鳴周波数が2GHz以上であること、が好ましい。
- [0018] 上記第2の目的を達成する本発明の高周波用磁性薄膜の作製方法は、Co系非晶質合金層とこのCo系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜を印加磁場中で作製する高周波用磁性薄膜の作製方法であって、多層膜全体の体積に対する酸化層の割合が5〜50%の範囲内に入るように成膜することを特徴とするものである。
- [0019] 本発明における他の高周波用磁性薄膜の作製方法は、成膜時における外部磁場の印加方向が磁化容易軸となる性質をもつCo系非晶質合金層を外部磁場の下で形成する第1の工程と、Co系非晶質合金の酸化層を形成する第2の工程とを含み、第1の工程および第2の工程を交互に繰り返してCo系非晶質合金層およびその酸化層からなる多層膜を形成し、その作製された多層膜全体としての磁化容易軸が外部磁場の印加方向と直交するようにしたものである。
- [0020] Co系非晶質合金層と酸化層とを、多層膜全体の体積に対する酸化層の割合が5〜50%の範囲内となるように印加磁場中で成膜すると、作製された多層膜の磁化容易軸が多層膜の成膜時における磁場印加方向と直交するという、磁化容易軸／困難軸の反転現象が現れる。こうした現象はいわゆる磁歪の逆効果と考えられるが、本発明の高周波磁性薄膜の作製方法によれば、その現象に基づいて発現する大きな

異方性磁界と高い比抵抗を示す高周波磁性薄膜を作製できるので、GHz帯域での高周波特性に優れた磁性薄膜を極めて容易な方法で作製することができる。

[0021] 本発明の高周波磁性薄膜の作製方法では、特に、Co系非晶質合金層をCoZrNb合金で形成することが好ましい。CoZrNb合金を用いた場合には、磁歪がゼロになるような組成が容易に実現可能であり、その結果、軟磁気特性に優れ、高い透磁率が得られるからである。

[0022] 上記第3の目的を達成する本発明の磁気素子は、上述した本発明の高周波用磁性薄膜、または、上述した本発明の方法で作製された高周波用磁性薄膜、を一部に有することを特徴とする。

[0023] 本発明の磁気素子では、(a)高周波用磁性薄膜がコイルを挟持するように対向配置されていること、(b)インダクタまたはトランスに使用されること、または、(c)モノリシックマイクロ波集積回路に使用されること、が好ましい。

[0024] 以上のように、本発明の高周波用磁性薄膜によれば、高い異方性磁界と高い比抵抗を有しているので、GHz帯域の高周波領域で利用できる高周波用磁性薄膜を提供することができる。その結果、本発明の高周波用磁性薄膜は、例えばMMICに搭載される平面型スパイラルコイルを有するインダクタ等に適用されるGHz帯域用の磁性薄膜として好ましく利用可能である。なお、本発明の高周波用磁性薄膜は、室温で成膜したまま(as-deposit)の状態であっても良好な性能が得られるので、例えばMMICのように、加熱工程を嫌う半導体プロセスで製作される高周波集積回路に最適である。

[0025] また、本発明の高周波用磁性薄膜の製造方法によれば、磁歪の逆効果と考えられる現象により大きな異方性磁界と高い比抵抗を示す高周波磁性薄膜を作製できるので、GHz帯域での高周波特性に優れた磁性薄膜を極めて容易な方法で作製することができる。

[0026] また、本発明の磁気素子は、高い異方性磁界と高い比抵抗を有した高周波用磁性薄膜をその一部に備えているので、優れた高周波特性をもつ磁気素子を得ることができる。例えばMMICに搭載されるプレーナ型インダクタ中のスパイラルコイルにその高周波用磁性薄膜を適用した場合には、そのインダクタを、GHz帯域に共鳴周波

数を有する磁気素子として良好に機能させることができる。

### 図面の簡単な説明

- [0027] [図1]本発明の一実施の形態における高周波用磁性薄膜の断面構造の一例を示す模式図である。
- [図2]成膜時に一定方向から磁場を印加しながら基板上に成膜して得られたCoZrNb薄膜(比較例)の磁化ヒステリシス曲線を示すグラフである。
- [図3]図2におけるCoZrNb薄膜の共鳴周波数特性を示すグラフである。
- [図4]成膜時に一定方向から磁場を印加しながら基板上に成膜して得られたCoZrNb薄膜と自然酸化層とからなる多層膜(実施の形態)の磁化ヒステリシス曲線を示すグラフである。
- [図5]図4における多層膜の共鳴周波数特性を示すグラフである。
- [図6A]平面型の磁気素子をインダクタに応用した場合のインダクタの構成を示す平面図である。
- [図6B]図6Aに示したインダクタの構成を示す断面図である。一例である。
- [図7]本発明の実施の形態における平面型磁気素子をインダクタに応用した他の一例を示す断面模式図である。
- [図8]インダクタの導体層部分を抜き出した模式的な平面図である。
- [図9]図8のA-A矢視断面の模式図である。
- [図10]磁化反転現象の確認実験結果である。

### 発明を実施するための最良の形態

- [0028] 以下、本発明の高周波用磁性薄膜およびその作製方法、ならびに磁気素子について、図面を参照しつつ説明する。なお、本発明の範囲は、以下に説明する実施の形態によって制限されるものではない。
- [0029] 図1は、本発明の高周波用磁性薄膜の断面形態の一例を示す模式断面図である。
- [0030] 本発明の高周波用磁性薄膜1は、図1に示されるように、基板4の上に、Co系非晶質合金層2と、そのCo系非晶質合金の自然酸化層3とを交互に積層してなる多層膜である。そして、その特徴は、多層膜全体の体積に対する自然酸化層3の割合が5〜50%であることにある。

[0031] (Co系非晶質合金層)

Co系非晶質合金層2は、Coを含有する非結晶質の合金であり、成膜時における磁場印加方向が磁化容易軸となる性質を有するものである。Co系非結晶質合金は、透磁率が高く且つ高抵抗(比抵抗が $100\sim 120\ \mu\ \Omega\text{cm}$ )であるため、高周波域での渦電流損失の抑制に効果があり、本発明において好ましく適用される。Co系非結晶質合金は、単層膜で透磁率1000以上(10MHz)、飽和磁化1.0T(=10kG)以上、比抵抗 $100\ \mu\ \Omega\text{cm}$ 以上の特性を有するものであることが望ましい。

[0032] このCo系非結晶質合金は、Coを主成分とし、B, C, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Y, Zr, Nb, Mo, Hf, TaおよびWの群から選択される1種または2種以上の添加元素を含んでおり、非晶質相を主体として構成されている。なお、非晶質合金ないし非晶質相とは、一般に、X線回折測定において得られる回折パターンが顕著な結晶性ピークを有しない態様として表れるものであり、いわゆるブロードな回折ピークが表れるものをいう。

[0033] Co系非晶質合金に添加される元素の割合(2種以上の場合は総和量)は、通常5～50at%(原子%)、好ましくは10～30at%である。添加元素の割合が50at%を超えると、飽和磁化が小さくなるという不都合が生じる。一方、添加元素の割合が5at%未満では、磁歪の制御が困難となり、有効な軟磁気特性が得られなくなるという不都合が生じる。

[0034] Co系非結晶質合金としては、例えば、CoZr, CoHf, CoNb, CoMo, CoZrNb, CoZrTa, CoFeZr, CoFeNb, CoTiNb, CoZrMo, CoFeB, CoZrNbMo, CoZrMoNi, CoFeZrB, CoFeSiB, CoZrCrMo等が挙げられる。特に好ましくは、CoZrNbが挙げられる。CoZrNbが好適である理由は、磁歪がゼロになるような組成(例えば、Co<sub>87</sub>Zr<sub>5</sub>Nb<sub>8</sub>)が容易に実現可能であり、その結果、軟磁気特性に優れた高い透磁率の高周波用磁性薄膜が得られるという利点があるからである。

[0035] (自然酸化層)

自然酸化層3は、上述したCo系非結晶質合金層2の表面が酸素と接触することによって自然に生成する酸化層のことであり、例えば、大気中、純水中または薬液中で形成される酸化層の他、成膜装置内の残留酸素や残留水分により形成される酸化

層も含まれる。

- [0036] 形成される自然酸化層3は、通常、0.1〜2.0nm程度の厚さであり、自然酸化層であるためにあまり厚くは形成されない。また、その比抵抗は、およそ $10^3 \sim 10^6 \mu \Omega$  cm程度である。
- [0037] (多層膜)
- 本発明に係る多層膜1は、Co系非晶質合金層2と自然酸化層3とを交互に積層して形成される。具体的には、成膜時に一定方向から磁場を印加しながら基板上にCo系非晶質合金層2を形成する工程と、そのCo系非晶質合金層の表面に自然酸化層3を形成する工程とを交互に行うことにより形成される。
- [0038] 多層膜1は、真空薄膜形成方法、特にスパッタ法により形成されることが好ましい。より具体的には、RFスパッタ、DCスパッタ、マグネトロンスパッタ、イオンビームスパッタ、誘導結合RFプラズマ支援スパッタ、ECRスパッタ、対向ターゲット式スパッタ等が用いられる。なお、スパッタリングはあくまで本実施の形態の一態様であり、他の薄膜作成プロセスを適用できることは言うまでもない。
- [0039] Co系非晶質合金層を堆積させるためのターゲットとしては、Coターゲット上に、所望の添加元素のペレットを配置した複合ターゲットを用いたり、所望の添加成分を含有するCo合金のターゲットを用いればよい。
- [0040] なお、本発明の多層膜1が形成される基板4(図1を参照)としては、ガラス基板、セラミクス材料基板、半導体基板、樹脂基板等が例示できる。セラミクス材料としては、アルミナ、ジルコニア、炭化珪素、窒化珪素、窒化アルミニウム、ステアタイト、ムライト、コージライト、フォルステライト、スピネル、フェライト等が挙げられる。中でも熱伝導率が大きく、曲げ強度も大きい窒化アルミニウムを用いることが好ましい。
- [0041] また、本実施の形態の多層膜は、室温(約15〜35℃)で成膜したままの状態での性能が発揮できるので、MMICのような半導体プロセスで製作される高周波集積回路に最適な材料である。したがって、基板4としては、Si、GaAs、InP、SiGe等の半導体基板が例示できる。
- [0042] 多層膜1はこうしたプロセスを繰り返すことによって形成されるが、その層数は特に制限されず、また、多層膜全体の厚さについても特に制限されない。なお、Co系非



晶質合金層2とその自然酸化層3とからなる多層膜1の比抵抗は $150 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上となり、また、多層膜1の異方性磁界 $H_k$ は $10^5 / 4 \pi [\text{A/m}] (= 100 \text{ Oe})$ 以上となる。比抵抗が $150 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上になる理由は、Co系非晶質合金層2自体の比抵抗が $100 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上であり、さらに自然酸化層3の比抵抗が $10^3 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上であるからである。また、異方性磁界が $10^5 / 4 \pi [\text{A/m}]$ 以上となる理由は、以下に示す磁化反転現象に基づくものと考えられる。

[0043] すなわち、本発明の多層膜1において、多層膜全体の体積に対する自然酸化層3の割合が5〜50%の範囲内にある場合には、作製された多層膜1の磁化容易軸が、その多層膜の成膜時における磁場印加方向と直交する( $90^\circ$  ずれることをいう。)磁化反転現象が現れる。こうした現象は、いわゆる磁歪の逆効果現象と考えられる。なお、多層膜全体の体積に対する自然酸化層3は、好ましくは10%以上45%以下である。

[0044] 図2は、成膜時に一定方向から磁場を印加しながら基板上に成膜して得られた厚さ500nmのCoZrNb薄膜(比較例)の磁化ヒステリシス曲線を示すグラフであり、図3は、得られたCoZrNb薄膜の共鳴周波数特性を示すグラフである。また、図4は、成膜時に一定方向から磁場を印加しながら基板上に成膜して得られる厚さ8nmのCoZrNb薄膜と厚さ1nmの自然酸化層とを交互に積層してなる厚さ450nmの多層膜(実施例)の磁化ヒステリシス曲線を示すグラフであり、図5は得られた多層膜の共鳴周波数特性を示すグラフである。図4および図5に使用した多層膜において、多層膜全体の体積に対する自然酸化層の体積は11%である。なお、図2および図4において、横軸は外部印加磁界 $H$ (単位Oe)を示し、縦軸は磁化(単位G)を示す。符号Eは磁化容易軸方向における磁化曲線を示し、符号Dは磁化困難軸方向における磁化曲線を示す。また、図3および図5において、横軸は周波数(単位MHz)を示し、縦軸は透磁率の実部 $\mu_1$ 、虚部 $\mu_2$ を示す。

[0045] 図2中に示したように、CoZrNb薄膜においては、成膜時に印加される磁場 $H_{\text{appl}}$ の方向が磁化容易軸Eの方向と一致するのが一般的であり、したがって、磁化困難軸Hの方向は印加磁場 $H_{\text{appl}}$ の方向と直交する。しかし、CoZrNb薄膜は、比抵抗が $120 \mu \Omega \text{ cm}$ と比較的高いものの、異方性磁界 $H_k$ は $15 \times 10^3 / 4 \pi [\text{A/m}] (=$

15Oe)と小さいので、図3に示すように、共鳴周波数特性は、 $f_r = 1\text{GHz}$ を超えたところで落ち込んでしまう。

[0046] 一方、図3に示したように、CoZrNb薄膜／自然酸化層の多層膜においては、成膜時に印加される磁場 $H_{\text{appl}}$ の方向と磁化容易軸 $E$ の方向とは一致せず、両者は直交している。言い換えれば、成膜時に印加される磁場 $H_{\text{appl}}$ の方向と磁化困難軸 $H$ の方向とが一致する。このとき、得られた多層膜は、比抵抗が $180\mu\Omega\text{cm}$ と高く、しかも、異方性磁界 $H_k$ も $105 \times 10^3 / 4\pi [\text{A/m}] (= 105\text{Oe})$ と高くなっている。その異方性磁界 $H_k$ が大きいほど高周波特性に優れた多層膜が得られることから、実際には図5に示すように、共鳴周波数特性は、 $f_r = 2\text{GHz}$ を超えても、落ち込みが生じないという効果がある。

[0047] 本発明の多層膜において、自然酸化層3の割合が全体の5%未満では、そうした磁化反転現象が現われないことがある。一方、自然酸化層3の割合が全体の50%を超えた場合は、非磁性成分の割合が磁性成分の割合より多くなるため、軟磁性材料としての使用が困難である。

[0048] (多層膜の高周波特性)

本発明の多層膜は、上述した構造を有するので、比抵抗が $150\mu\Omega\text{cm}$ 以上、異方性磁界が $10^5 / 4\pi [\text{A/m}] (= 100\text{Oe})$ 以上、強磁性共鳴周波数が $2\text{GHz}$ 以上という優れた高周波特性を有している。このような特性は、熱処理等を施さない成膜のままの状態で得ることができる。

[0049] (磁気素子)

本発明の磁気素子は、上述した高周波用磁性薄膜をその一部に備えていることに特徴がある。

[0050] 図6Aは、平面型の磁気素子を適用したインダクタの平面構造を模式的に示したものであり、図6Bは図6AのA-A矢視断面構造を模式的に示したものである。

[0051] このインダクタ10は、基板11と、この基板11の両面にスパイラル状に形成された平面コイル12、12と、これらの平面コイル12、12と基板11面を覆うように形成された絶縁膜13、13と、これらの各々の絶縁膜13、13の上を覆うように形成された一対の高周波用磁性薄膜1とを備えている。高周波用磁性薄膜1は、図1に示したものと同様の

構造を有する。2つの平面コイル12, 12は、基板11の略中央部分に形成されたスルーホール15を介して電氣的に接続されている。さらに、基板11の両面の平面コイル12, 12からそれぞれ接続のための端子16が基板11の外方に引き出されている。このようなインダクタ10は、一対の高周波用磁性薄膜1によって、絶縁膜13, 13を介して平面コイル12, 12を挟むように構成されており、接続端子16, 16間にインダクタが形成される。

[0052] このように形成されたインダクタは、小型かつ薄型軽量であり、特に1GHz以上の高周波帯域で優れたインダクタンスを示す。なお、上記説明したインダクタ10において、平面コイル12, 12を並列的に複数設けることによりトランスを形成することができる。

[0053] 図7は、本実施の形態の平面型磁気素子をインダクタに応用した他の一例を示す断面模式図である。

[0054] この図に示されるインダクタ20は、基板21と、この基板21の上に必要に応じて形成される酸化膜22と、この酸化膜22の上に形成された高周波用磁性薄膜1aと、この高周波用磁性薄膜1aの上に形成された絶縁膜23を備え、さらにこの絶縁膜23の上に形成された平面コイル24と、これらの平面コイル24と絶縁膜23を覆うように形成された絶縁膜25と、この絶縁膜25の上に形成された高周波用磁性薄膜1bとを有している。高周波用磁性薄膜1a, 1bは、上記した高周波用磁性薄膜1(図1)と同様の構造を有するものである。このように形成されたインダクタ20もやはり、小型かつ薄型軽量であり、特に1GHz以上の高周波帯域で優れたインダクタンスを示す。そしてこのようなインダクタ20において、平面コイル24を並列的に複数設けることによりトランスを形成することができる。

[0055] 図8および図9は、高周波用磁性薄膜1をMMIC用インダクタとして応用した実施例であり、図8はインダクタの導体層部分を抜き出した平面図を模式的に示したものであり、図9は図8のA-A矢視断面を模式的に示した図面である。

[0056] これらの図面で示されているインダクタ30は、基板31と、この基板31の上に必要に応じて形成される絶縁酸化膜32と、その絶縁酸化膜32の上に形成された高周波用磁性薄膜1aと、この高周波用磁性薄膜1aの上に形成された絶縁膜33を備え、さら

にこの絶縁膜33の上に形成されたスパイラルコイル34と、このスパイラルコイル34と絶縁膜33を覆うように形成された絶縁膜35a、35bと、この絶縁膜35bの上に形成された高周波用磁性薄膜1bとを有している。高周波用磁性薄膜1a、1bは、上記した高周波用磁性薄膜1(図1)と同様の構造を有するものである。

- [0057] また、スパイラルコイル34は、配線36を介して一对の電極37に接続されている。そして、スパイラルコイル34を囲むように設けられた一对のグラウンドパターン39は、それぞれ一对のグラウンド電極38に接続され、グラウンド—シグナル—グラウンド(G—S—G)タイプのプロープにより、ウェハ上で周波数特性を評価する形状を有している。
- [0058] 本実施の形状にかかるMMIC用インダクタにおいては、磁芯となる高周波用磁性薄膜1a、1bによってスパイラルコイル34が挟み込まれた有芯構造を採用している。そのため、スパイラルコイル34が同じ形状でありながら、高周波用磁性薄膜1a、1bが形成されていない空芯構造のインダクタに比べて、インダクタンス値が約50%向上される。したがって、同じインダクタンス値を得るために必要なスパイラルコイル34の占有面積は小さくてもよいことになり、その結果としてスパイラルコイル34の小型化が実現できる。
- [0059] ところで、MMIC用インダクタに適用する磁性薄膜の材料としては、GHz帯域の高周波数で高透磁率、かつ高い性能指数Q(低損失)特性を持つことや、半導体製造プロセスによる集積化が可能であることが求められる。
- [0060] GHz帯域の高周波数における高透磁率を実現するためには、共鳴周波数が高く、かつ飽和磁化が大きい材質が有利であり、一軸磁気異方性の制御が必要である。また、高い性能指数Qを得るためには、高抵抗化による渦電流損失の抑制が重要である。さらに、集積化プロセスに適用するためには、室温で成膜でき成膜のままの状態で使用できることが望ましい。すでにセッティングされている他のオンチップコンポーネントの性能および作成プロセスに加熱による悪影響を及ぼさないようにするためである。

## 実施例

- [0061] 以下、本実施の形態の高周波用磁性薄膜について、実施例および比較例に基づいてさらに詳細に説明する。

## [0062] (実施例1)

実施例1の高周波用磁性薄膜を以下の成膜手法に従って作製した。

[0063] 先ず、Siウェハの上に $\text{SiO}_2$ を500nmの厚さに成膜したものを基板として用いた。次に、対向ターゲット式スパッタ装置を用いて、下記の要領で基板上に高周波用磁性薄膜を成膜(deposit)させた。すなわち、対向ターゲット式スパッタ装置内を $8 \times 10^{-5}$ Paまで予備排気した後、圧力が10PaになるまでArガスを導入し、100WのRFパワーで10分間、基板表面をスパッタエッチングした。次いで、圧力が0.4PaになるようにArガスの流量を調整し、300Wのパワーで $\text{Co}_{87}\text{Zr}_5\text{Nb}_8$ ターゲットをスパッタリングして、 $\text{Co}_{87}\text{Zr}_5\text{Nb}_8$ 組成からなる非晶質膜を作製した。

[0064] 次いで、自然酸化層を形成した。自然酸化層は、各金属層を成膜した後、スパッタ装置内部に2sccmの $\text{O}_2$ ガスを30秒間導入し金属層の表面を酸化させることで形成した。自然酸化層を形成してから、スパッタ装置を $10^{-4}$ Pa台まで排気した。

[0065] 成膜時には基板に0〜80VのDCバイアスを印加した。また、ターゲット表面の不純物の影響を防止するためにシャッターを閉めた状態で10分以上プリスパッタリングを行った。その後、シャッターを開けることにより基板上に成膜を行った。成膜速度(rate)は、CoZrNb層の成膜時で0.33nm/秒とした。シャッターの開閉時間を制御することでCo系非晶質合金層の膜厚を調整した。

[0066] 成膜は、約 $35 \times 10^3 / 4\pi$  [A/m] (=35Oe)の強さの磁界を印加しながら、まず、基板上の第1層目として厚さ8.0nmのCoZrNb層を成膜した後、その上に第2層目として厚さ1.0nmの自然酸化層を形成し、さらにその自然酸化層上にCoZrNb層を成膜するという成膜サイクルを50回繰り返す、表1に示す特性の磁性薄膜(実施例1)を得た(総厚さ:450nm)。このとき、多層膜全体の体積に対する自然酸化層の割合は11%であった。

[0067] 上述した図4は、実施例1で得られた磁性薄膜のヒステリシス曲線であり、図5は、その磁性薄膜の高周波特性である。得られた磁化曲線から明らかなように、堆積膜では、印加磁場の方向と磁化容易軸方向とが $90^\circ$ ずれる(直交する)現象が確認された。このときの飽和磁化 $4\pi M_s$ は1.01T (=10.1kG)、磁化容易軸方向の保磁力 $H_{ce}$ は63.7A/m (=0.8Oe)、磁化困難軸方向の保磁力 $H_{ch}$ は382A/m (=4

80e)であった。また、異方性磁界 $H_k$ は $8360\text{A/m}$ ( $=105\text{Oe}$ )であった。図5の高周波透磁率特性のグラフから明らかなように、共鳴周波数は測定限界の3GHzを超えており、透磁率の実数部( $\mu'$ )の値として、1.0GHzでは80の値が得られた。また、比抵抗は $180\mu\Omega\text{cm}$ であった。なお、高周波透磁率の測定は、超高周波帯域透磁率測定装置(菱和電子、PMF-3000)を用い、磁気特性は振動試料型磁力計(理研電子、BHV-35)を用いて測定した。

[0068] (実施例2)

上記実施例1の成膜手法に基づき、2.3nm厚のCoZrNbと、1.0nmの自然酸化層とを交互に121回ずつ順次形成して総膜厚400nm(合計242層相当)の磁性薄膜(実施例2)を形成した。このとき、多層膜全体の体積に対する自然酸化層の割合は30%であった。

[0069] 得られた磁性薄膜の磁気特性を表1に示した。飽和磁化 $4\pi M_s$ は $0.80\text{T}$ ( $=8.0\text{kG}$ )、磁化容易軸方向の保磁力 $H_{ce}$ は $1400\text{A/m}$ ( $=17.6\text{Oe}$ )、磁化困難軸方向の保磁力 $H_{ch}$ は $2950\text{A/m}$ ( $=37\text{Oe}$ )であった。高周波透磁率特性は、透磁率の実数部( $\mu'$ )の値として、1.0GHzでは40の値が得られ、また、比抵抗は $860\mu\Omega\text{cm}$ であった。

[0070] (実施例3)

上記実施例1の成膜手法に基づき、1.6nm厚のCoZrNb層を成膜後、スパッタ装置内部に5sccmの $\text{O}_2$ ガスを30秒間導入し金属層の表面を酸化させることで1.3nmの自然酸化層を形成した。1.6nm厚のCoZrNb層と1.3nmの自然酸化層を交互に138回ずつ順次形成して総膜厚400nm(合計276層相当)の磁性薄膜(実施例3)を形成した。このとき、多層膜全体の体積に対する自然酸化層の割合は45%であった。

[0071] 得られた磁性薄膜の磁気特性を表1に示した。飽和磁化は $0.63\text{T}$ ( $=6.3\text{kG}$ )、磁化容易軸方向の保磁力 $H_{ce}$ は $1750\text{A/m}$ ( $=22\text{Oe}$ )、磁化困難軸方向の保磁力 $H_{ch}$ は $3260\text{A/m}$ ( $=41\text{Oe}$ )であった。高周波透磁率特性は、透磁率の実数部( $\mu'$ )の値として、1.0GHzでは25の値が得られ、また、比抵抗は $1416\mu\Omega\text{cm}$ であった。

## [0072] (比較例1)

上記実施例1の成膜手法に基づき、500  $\mu\text{m}$ 厚のCoZrNb膜を単層形成し、比較例1の磁性薄膜を形成した。

[0073] 上記の実施例に準じた方法によって、当該磁性薄膜の物性値を求めたところ、表1に示すように、1.15T(=11.5kG)の飽和磁化と、104A/m(=1.3Oe)の磁化容易軸方向の保磁力 $H_{ce}$ と、71.6A/m(=0.9Oe)の磁化困難軸方向の保磁力 $H_{ch}$ とがそれぞれ得られた。高周波透磁率特性は、透磁率の実数部( $\mu_1$ )の値として、1.0GHzでは1000の値が得られ、また、比抵抗は120  $\mu\Omega\text{cm}$ であった。

## [0074] (結果)

これらの結果を含めた測定値を表1にまとめて示した。表1に示すように、本実施の形態における各実施例1〜3によれば、高共鳴周波数かつ高抵抗の特性を得ることができる。なお、表1では、1GHzにおける透磁率の実数部 $\mu_1$ のみを示しており、比較例の $\mu_1$ に対して実施例1〜3の $\mu_1$ が小さくなっているため、一見すると比較例よりも実施例の方が特性が悪いように見える。ところが、実際には、図3および図5に示したように、実施例における1GHzでの透磁率の虚数部 $\mu_2$ の値( $<2$ )が比較例における虚数部 $\mu_2$ ( $\approx 1000$ )に比べて十分に小さくなっているため、性能指数 $Q(=\mu_1/\mu_2)$ に着目すると、比較例の $Q$ 値に比べて実施例の $Q$ 値が十分大きくなっている。虚数部 $\mu_2$ は損失を表すものであり、これが小さければ $Q$ 値が大きくなる。 $Q$ 値が大きいということは、損失が小さいことを意味する。すなわち、実施例では、比較例に比べて1GHzにおける損失が低減されており、特性が格段に改善されていることがわかる。

[0075] 図10は、磁化反転現象の確認実験結果を表すものである。この確認実験では、振動試料型磁力計(理研電子、BHV-35)装置を用い、試料を面内方向で回転(成膜中の磁場印加方向に対する角度ズレを $\phi$ として横軸に示す)しながら残留磁化( $M_r$ )を測定し、その値を飽和磁化( $M_s$ )で規格化して縦軸に表記した。実施例1〜3の磁性薄膜と比較例1の磁性薄膜とを対比した結果、図示したように、両者の磁化容易軸には90°のズレがあった。すなわち、実施例1〜3においては、成膜時の磁場印加方向と得られた磁性薄膜の磁化容易軸方向とは直交しているが(図4参照)、比較例1においては、成膜時の磁場印加方向と得られた磁性薄膜の磁化容易軸方向とは

平行である(図2参照)ことが確認された。

[0076] [表1]

	自然酸化層 vol%	CoZrNb 厚さ (nm)	自然酸化層厚さ (nm)	飽和磁化 (kG)	Hce (Oe)	Hch (Oe)	Hk (Oe)	fr (GHz)	比抵抗 ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	$\mu$ 1 at 1GHz
実施例 1	11	8	1	10.1	0.8	4.8	105	~3	180	80
実施例 2	30	2.3	1	8	17.6	37	200	2.5	860	40
実施例 3	45	1.6	1.3	6.3	22	41	>250	>3	1416	25
比較例 1	0	500	0	11.5	1.3	0.9	15	1.25	120	1000



[0077] 以上、いくつかの実施の形態および実施例を挙げて本発明を説明したが、本発明はこれらの実施の形態および実施例に限定されず、種々の変形が可能である。例えば、Co系非晶質合金は、上記実施の形態および実施例に挙げた材料や組成には限定されない。また、本発明におけるCo系非晶質合金の酸化層は、自然酸化層3に限定されず、例えば加熱酸化等の強制的な酸化処理により生成される酸化膜であってもよい。また、高周波用磁性薄膜の適用対象は、薄膜インダクタや薄膜トランス等の高周波用の平面型磁気素子やMMIC等のデバイスに限定されるものではなく、他のデバイスにも適用可能である。

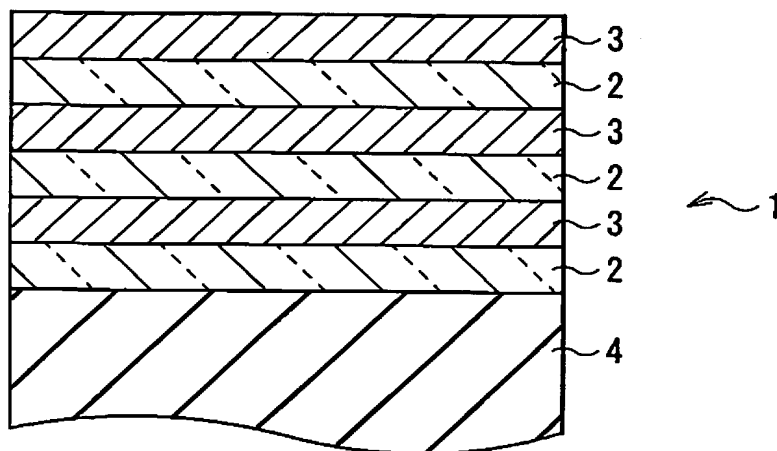
## 請求の範囲

- [1] Co系非晶質合金層と、このCo系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜であって、前記多層膜全体の体積に対する前記酸化層の割合が5〜50%であることを特徴とする高周波用磁性薄膜。
- [2] 成膜時における磁場印加方向が磁化容易軸となる性質をもつCo系非晶質合金層と、前記Co系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜であって、作製された多層膜の磁化容易軸が、その多層膜の成膜時における磁場印加方向と直交することを特徴とする高周波用磁性薄膜。
- [3] 前記Co系非晶質合金層がCoZrNb合金で形成されていることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [4] 前記Co系非晶質合金層がCoZrNb合金で形成されていることを特徴とする請求の範囲第2項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [5] 比抵抗が $150 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上であり、異方性磁界の強さが $10^5 / 4 \pi [\text{A/m}]$ 以上であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [6] 比抵抗が $150 \mu \Omega \text{ cm}$ 以上であり、異方性磁界の強さが $10^5 / 4 \pi [\text{A/m}]$ 以上であることを特徴とする請求の範囲第2項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [7] 強磁性共鳴周波数が2GHz以上であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [8] 強磁性共鳴周波数が2GHz以上であることを特徴とする請求の範囲第2項に記載の高周波用磁性薄膜。
- [9] Co系非晶質合金層とこのCo系非晶質合金の酸化層とからなる多層膜を印加磁場中で作製する高周波用磁性薄膜の作製方法であって、  
前記多層膜全体の体積に対する前記酸化層の割合が5〜50%の範囲内となるように成膜することを特徴とする高周波用磁性薄膜の作製方法。
- [10] 成膜時における外部磁場の印加方向が磁化容易軸となる性質をもつCo系非晶質合金層を、前記外部磁場の下で形成する第1の工程と、  
前記Co系非晶質合金の酸化層を形成する第2の工程と  
を含み、

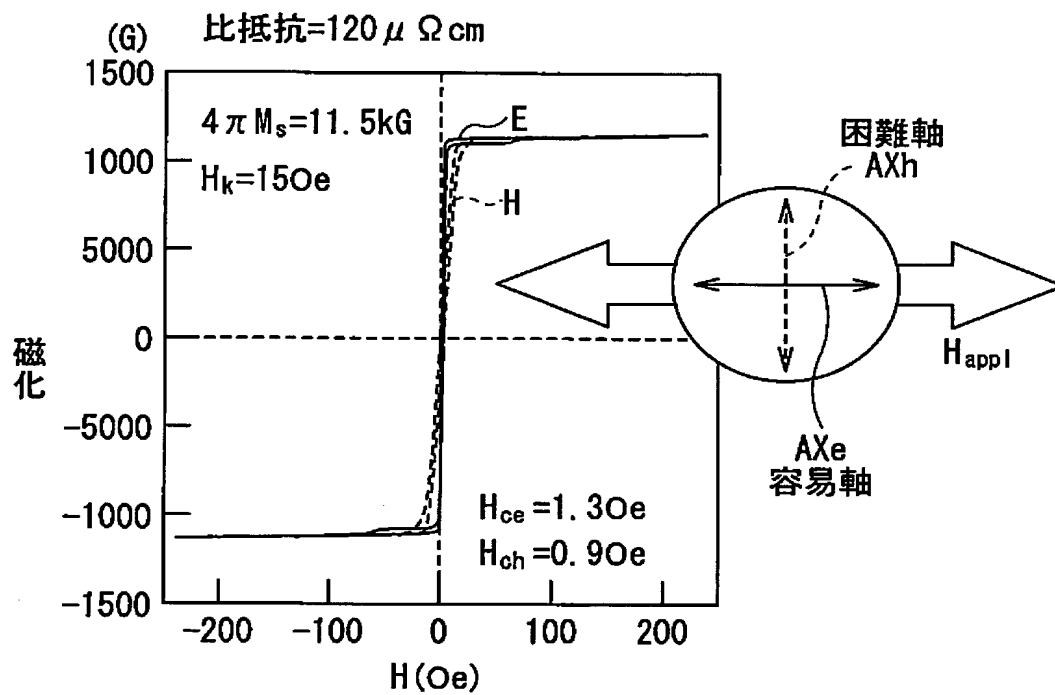
前記第1の工程および第2の工程を交互に繰り返してCo系非晶質合金層およびその酸化層からなる多層膜を形成し、その作製された多層膜全体としての磁化容易軸が、前記外部磁場の印加方向と直交するようにしたことを特徴とする高周波用磁性薄膜の作製方法。

- [11] 前記Co系非晶質合金層をCoZrNb合金で形成したことを特徴とする請求の範囲第9項に記載の高周波用磁性薄膜の作製方法。
- [12] 前記Co系非晶質合金層をCoZrNb合金で形成したことを特徴とする請求の範囲第10項に記載の高周波用磁性薄膜の作製方法。
- [13] 請求の範囲第1項に記載の高周波用磁性薄膜を一部に有することを特徴とする磁気素子。
- [14] 請求の範囲第2項に記載の高周波用磁性薄膜を一部に有することを特徴とする磁気素子。
- [15] コイルをさらに備え、  
一対の前記高周波用磁性薄膜が、前記コイルを挟持するように対向配置されていることを特徴とする請求の範囲第13項に記載の磁気素子。
- [16] コイルをさらに備え、  
一対の前記高周波用磁性薄膜が、前記コイルを挟持するように対向配置されていることを特徴とする請求の範囲第14項に記載の磁気素子。
- [17] インダクタまたはトランスに使用されることを特徴とする請求の範囲第13項に記載の磁気素子。
- [18] インダクタまたはトランスに使用されることを特徴とする請求の範囲第14項に記載の磁気素子。
- [19] モノリシックマイクロ波集積回路に使用されることを特徴とする請求の範囲第13項に記載の磁気素子。
- [20] モノリシックマイクロ波集積回路に使用されることを特徴とする請求の範囲第14項に記載の磁気素子。

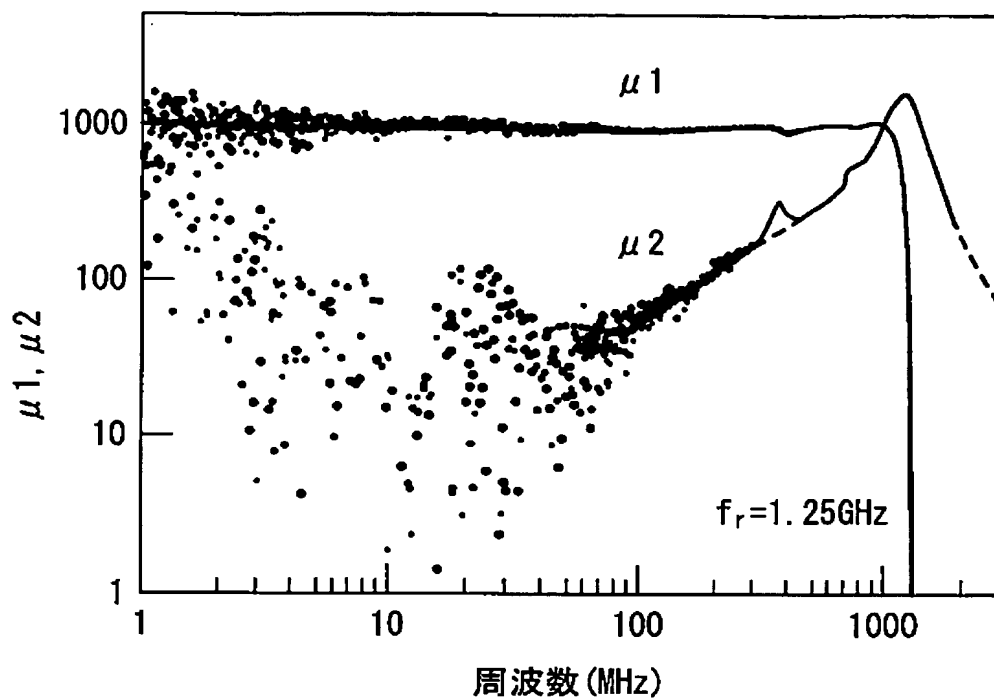
[図1]



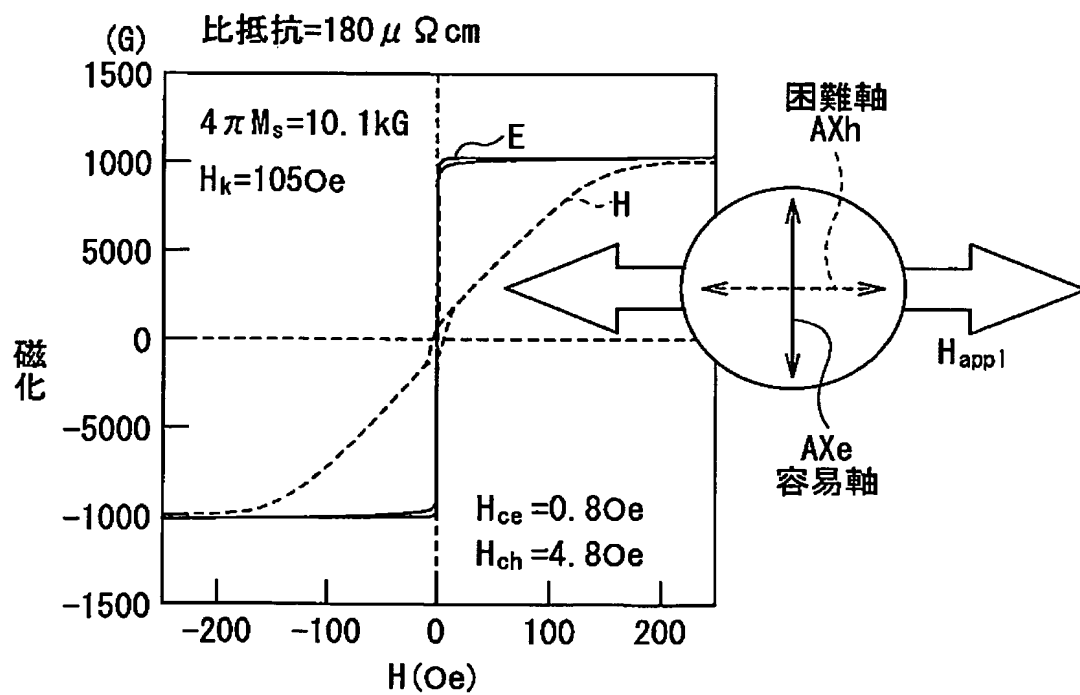
[図2]



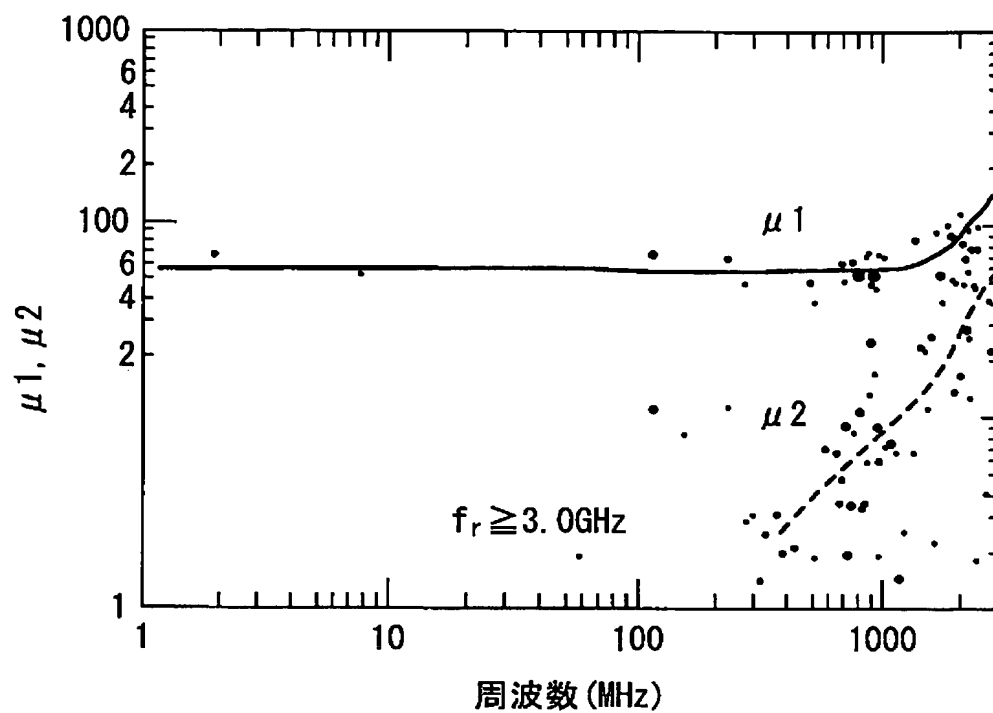
[図3]



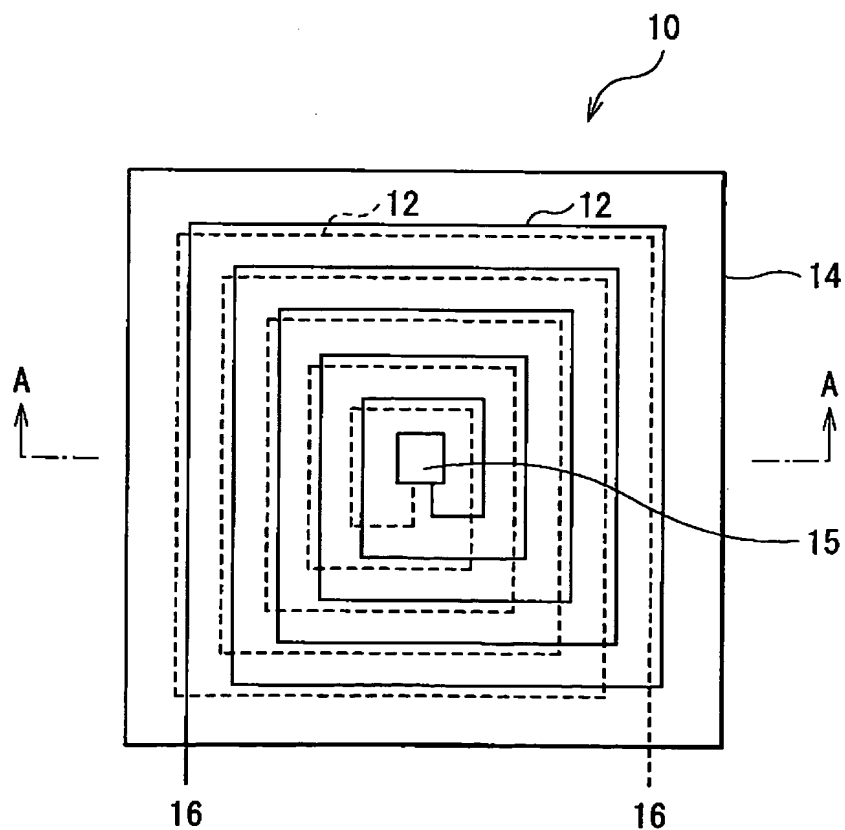
[図4]



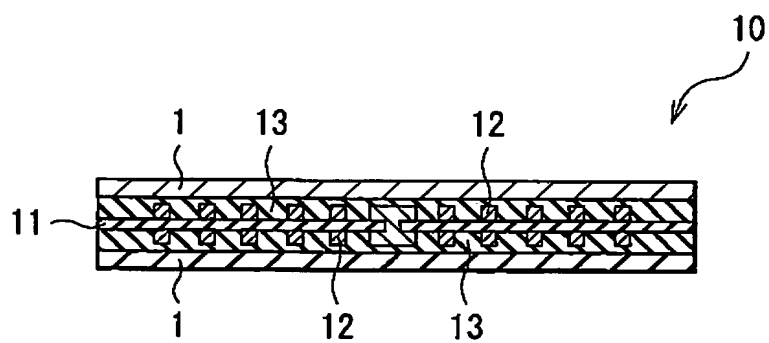
[図5]



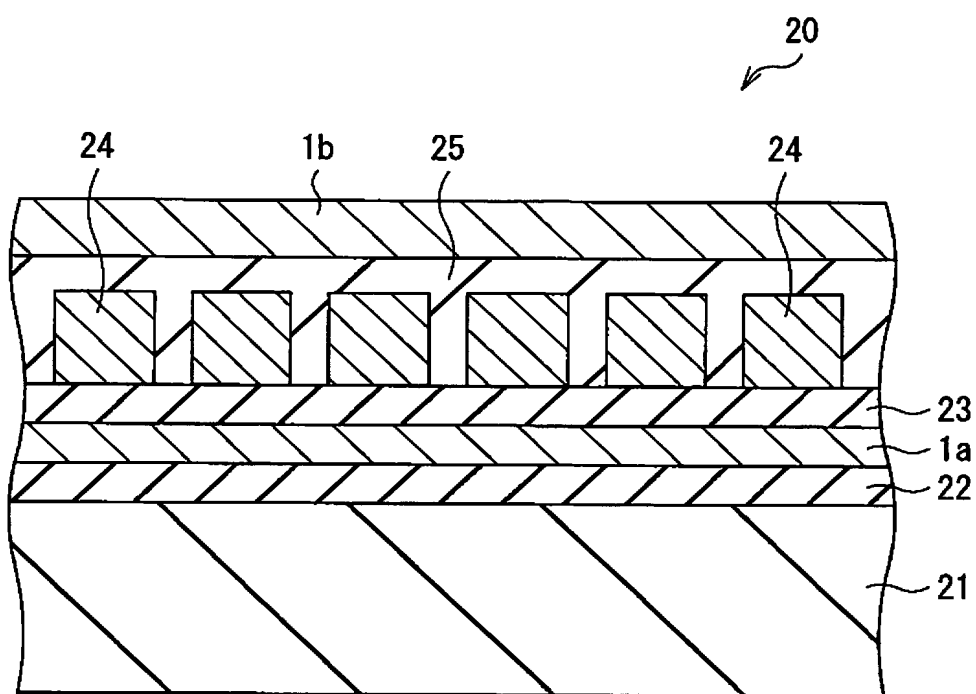
[図6A]



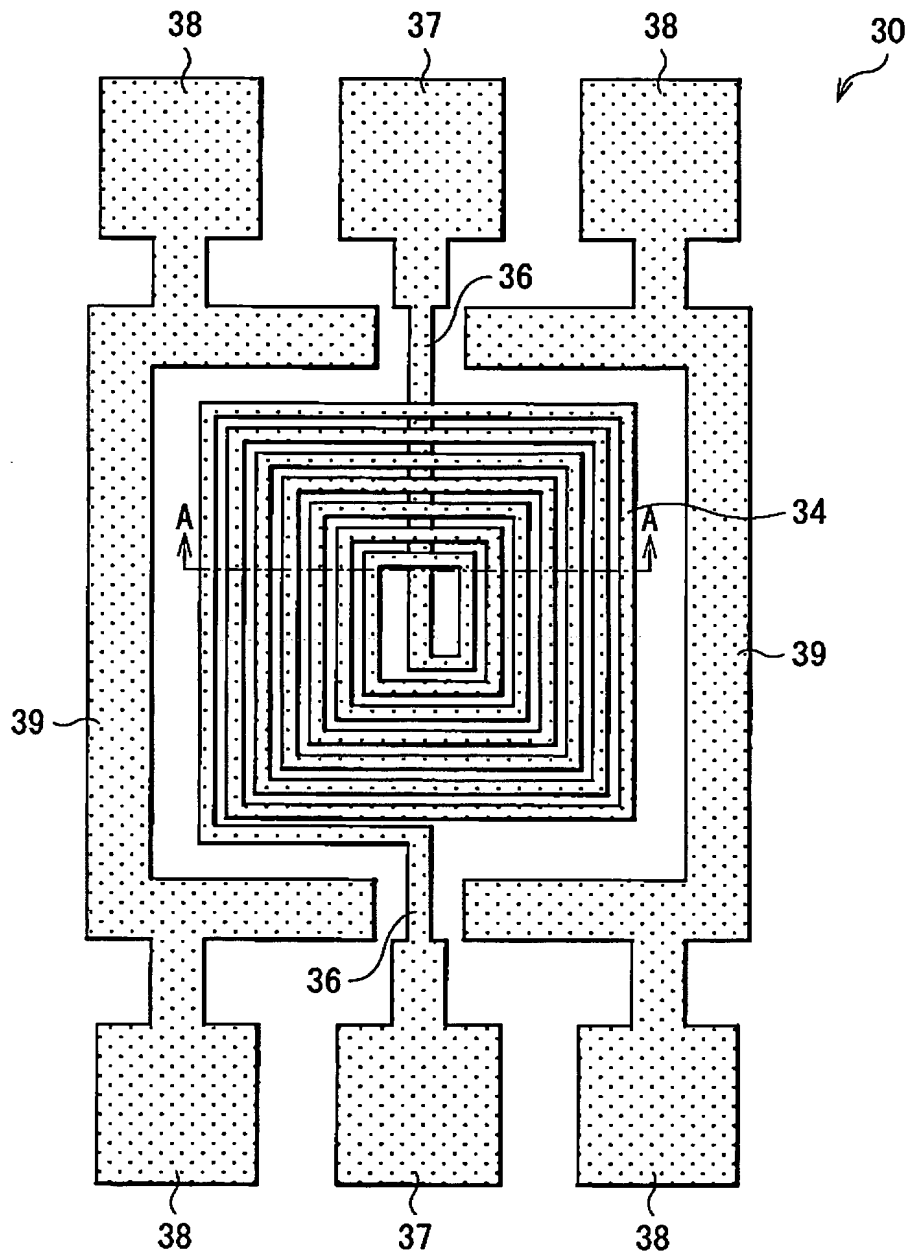
[図6B]



[図7]

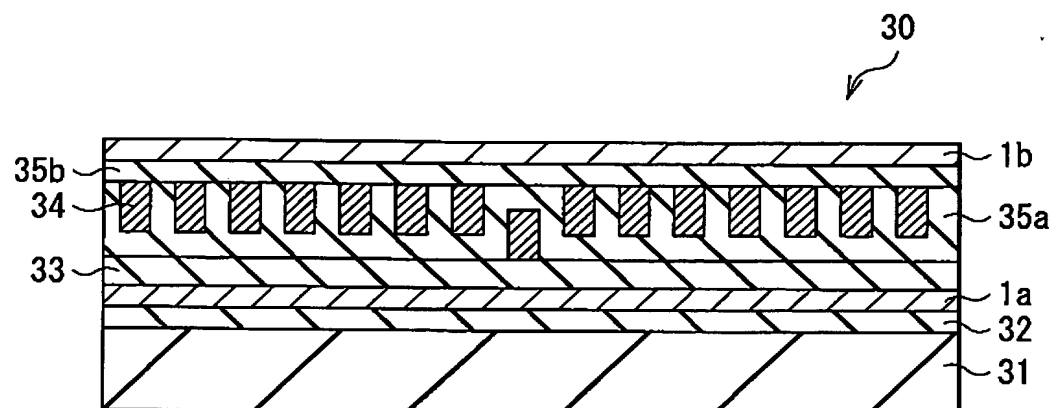


[図8]





[図9]



[図10]

